

# 三相异步电机缺相运行分析与实验

王瑞, 赵金, 邓歆, 刘洋

(华中科技大学 控制科学与工程系, 湖北 武汉 430074)

**摘要:**在航空航天、机车以及核工业等工业应用中, 如何使三相电机变频调速系统在缺相情况下继续运行, 是衡量系统可靠性的一个重要指标。运用对称分量法, 对三相异步电机缺相运行进行了详细的稳态分析, 给出了电压方程和转矩方程, 指出电机缺相运行带载能力大大降低以及采用传统 Volts/Hz 控制的可行性, 并探讨了缺相情况下的矢量控制方案, 最后给出了实验结果, 验证了分析的正确性。

**关键词:**缺相; 对称分量法; 矢量控制

**中图分类号:** TM346

**文献标识码:** A

## Analysis and Experiment for Asynchronous Motor in Default of One Stator Phase

WANG Rui, ZHAO Jin, DENG Xin, LIU Yang

(Department of Control Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, Hubei, China)

**Abstract:** In many industrial applications, such as aerospace, traction and nuclear industry, how to guarantee that the motor drive system can continue working even in default of one stator phase is one of the most important reliability indexes. The symmetrical-component method was used to analyze the steady-state operation of asynchronous motor in default of one stator phase. The voltage and torque equations were presented, pointed out the reduction of load capacity and feasibility of traditional Volts/Hz control, and then the vector control scheme under such fault condition was also investigated. At last, the experiments are carried out to verify the validity of the analysis.

**Key words:** phase default; symmetrical-component method; vector control

## 1 引言

三相异步电机变频调速系统以其优越的性能, 在工业应用中起着举足轻重的作用。然而, 在诸如航空航天, 机车牵引甚至核工业等工业应用中, 一旦三相电机某一相出现故障, 譬如晶闸管开路或短路、接头松动等而不切断该相, 将会导致灾难性的后果<sup>[1-2]</sup>。在这些场合, 系统的可靠性和容错能力是一项最重要的指标, 研究如何在缺相情况下能够继续单相运行而不至于停车, 具有重要的现实意义。文献[3]详细地分析了单绕组电机的特性, 指出其带载能力大大低于三相, 并给出了相应的开环控制策略。文献[4-5]提出通过注入奇次谐波电流来消除缺相运行下的低频振荡转矩。本文首先运用对称分量法, 详细地分析推导了三相电机缺相情况下的电压方程以及转矩

方程, 指出单相带载能力大大降低, 紧接着给出了缺相下的矢量控制策略, 最后在物理实验平台上进行了分析验证。

## 2 电机单相运行稳态分析

假设三相电机绕组为星型连接, 无中线, 在缺一相后将形成剩余两相绕组串联的单相电机, 如图 1 所示。由于缺相电流为零, 此时电机将工作在非对称状态, 因此可以运用对称分量法对其进行

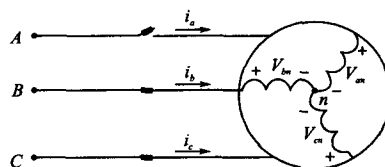


图 1 三相电机缺相示意图

Fig. 1 Schematic diagram of three phase motor in default of one stator phase

**基金项目:**国家自然科学基金资助项目(60874047);湖北省自然科学基金资助项目(2007ABA281)

**作者简介:**王瑞(1984-),男,博士研究生,Email:wangrui\_hust@163.com

行稳态分析<sup>[6]</sup>,这里只考虑基波分量。

现假设 A 相断开,则相电流  $i_a=0, i_b=-i_c$ , 对称分量电流为

$$\begin{bmatrix} i_{s+} \\ i_{s-} \\ i_{s0} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} j\frac{\sqrt{3}}{3}i_b \\ -j\frac{\sqrt{3}}{3}i_b \\ 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

同样根据电机相电压,对称分量电压为

$$\begin{bmatrix} V_+ \\ V_- \\ V_0 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} \quad (2)$$

考虑到 A 相断开,为了避开感应电压  $V_{an}$ ,利用式(2)中前两项进行相减有

$$V_+ - V_- = j\frac{\sqrt{3}}{3}(V_{bn} - V_{cn}) \quad (3)$$

结合式(1)、式(3),可得供电电压电流与正负序电压电流之间的关系

$$\begin{cases} V_k = j\sqrt{3}(V_+ - V_-) \\ i_b = -j\sqrt{3}i_+ = j\sqrt{3}i_- \end{cases} \quad (4)$$

其中,正序电流产生正向旋转磁场,负序电流产生反向旋转磁场。由式(4)可得单相运行电压方程,其等效电路如图 2 所示<sup>[7]</sup>。

$$V_k = i_b(Z_+ + Z_-) \quad (5)$$

图 2 中,  $s_+$  为正序转差率,  $s_-$  为负序转差率,且  $s_- = 2 - s_+$ ,  $Z_+, Z_-$  分别为正负序输入阻抗。输入电压是输入电流  $i_b$ 、正序转差率  $s_+$  以及供电频率  $\omega$  的函数。通过限制输入电流,可以得到相应的 Volt/Hz 曲线<sup>[4]</sup>。从图中可以看出,随着转速的升高,正序阻抗增大,负序阻抗变小,也就是说正向旋转磁场逐渐增大,负序旋转磁场逐渐减小,气隙合成磁场将转化成一个椭圆旋转磁场<sup>[7]</sup>。

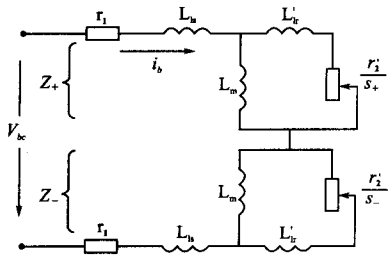


图 2 单相运行等效电路

Fig. 2 Equivalent circuit under single phase operation

对于正负序等效电路,可以分别计算正负序转矩,两者之差产生有效电磁转矩,若忽略激磁电

流,则正负序电路中定转子电流近似相等,转矩表达式可表示为

$$\begin{aligned} T_e &= T_{e+} + T_{e-} \\ &= \frac{n_p}{\omega} i_b^2 r'_2 \left( \frac{1}{s_+} - \frac{1}{2-s_+} \right) \end{aligned} \quad (6)$$

随着转速的降低,负序转矩所占比重增大,当转速为零时,正序转矩与负序转矩相等,使得有效电磁转矩为零,这就是单相电机没有自启动能力的原因。观察式(6),单相运行最多只能输出正常运行时转矩的 1/3。结合式(5)、式(6)可以推出采用 Volt/Hz 控制,机械特性曲线将随着供电频率  $\omega$  的变化而变化,如图 3 所示<sup>[3]</sup>。

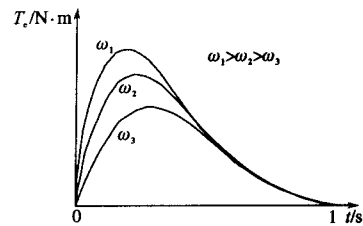


图 3 单相运行下机械特性曲线

Fig. 3 Mechanical characteristic curves under single phase operation

上述推导的电压以及转矩方程准确地描述了稳态下三相电机单相运行的特性,为单相开环 Volt/Hz 运行提供了思路 and 方案。

### 3 电机单相运行矢量控制策略

矢量控制作为一种成熟的技术已经在三相电机控制中被越来越多的采用。研究单相运行下的矢量控制策略同样具有现实意义。

#### 3.1 单相运行数学模型

考虑到电机缺相工作在非对称状态,故为了分析的方便采用  $\alpha-\beta$  静止坐标系<sup>[8]</sup>。同样假设 A 相断开,则  $i_a=0, i_b=-i_c$ ,

$$\begin{bmatrix} i_{s\alpha} \\ i_{s\beta} \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{2}{\sqrt{3}}i_b \end{bmatrix} \quad (7)$$

由  $i_a=0$  可得缺相情况下的定转子电压、磁链以及转矩方程

$$\begin{bmatrix} u_{s\alpha} \\ u_{s\beta} \\ u_{r\alpha} \\ u_{r\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + L_s p & 0 & L_m p & 0 \\ 0 & R_s + L_s p & 0 & L_m p \\ L_m p & \omega L_m & R_r + L_r p & \omega L_r \\ -\omega L_m & L_m p & -\omega L_r & R_r + L_r p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ i_{s\beta} \\ i_{s\alpha} \\ i_{r\beta} \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\begin{bmatrix} \Psi_{sa} \\ \Psi_{sb} \\ \Psi_{ra} \\ \Psi_{rb} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & 0 & L_m & 0 \\ 0 & L_s & 0 & L_m \\ L_m & 0 & L_r & 0 \\ 0 & L_m & 0 & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ i_{sb} \\ i_{ra} \\ i_{rb} \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$T_e = \frac{3}{2} n_p L_m i_{sb} i_{ra} \quad (10)$$

式(10)中电流均为正弦变量,故与电机正常运行不同,单相运行电磁转矩不是恒值,而是叠加有脉动分量,这是单相电源供电的特点<sup>[9]</sup>,用对称分量法可以解释为正序磁场和负序转子电流以及负序磁场和正序转子电流作用的结果。

### 3.2 单相运行矢量控制

单相运行下剩余两相串联,降低了可控电流的维数,因此可以考虑在矢量控制的结构下重构相电流。假设  $d, q$  轴电流给定定为  $i_{sd}^*, i_{sq}^*$ , 利用该参考电流分别计算出  $\alpha - \beta$  坐标系下正负序电流分量:

$$\begin{bmatrix} i_{sa}^+ \\ i_{sb}^+ \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \varphi & -\sin \varphi \\ \sin \varphi & \cos \varphi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sd}^* \\ i_{sq}^* \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$\begin{bmatrix} i_{sa}^- \\ i_{sb}^- \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \varphi & -\sin \varphi \\ \sin \varphi & \cos \varphi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sd}^* \\ i_{sq}^* \end{bmatrix} \quad (12)$$

从式(7)看出,单相下  $i_{sa} = 0$ , 结合式(11)、式(12)第1行可以求得使该等式成立的  $\varphi -$ ,

$$\varphi - = 2\varepsilon - \varphi$$

其中  $\varepsilon = \arctan(i_{sd}^*/i_{sq}^*)$

从而将式(11)、式(12)第2行相加即得

$$i_{sb}^* = i_{sb}^{*+} + i_{sb}^{*-} = 2|i^*| \cos(\varphi - \varepsilon) \quad (13)$$

其中  $|i^*| = \sqrt{(i_{sd}^{*2} + i_{sq}^{*2})}$

利用式(7)第2行,有

$$i_b^* = \sqrt{3}|i^*| \cos(\varphi - \varepsilon) \quad (14)$$

式(14)给出了理想情况下的定子电流给定,通过坐标变换可以求得实际  $d, q$  轴电流

$$\begin{cases} i_{sd} = i_{sd}^* + |i^*| \sin(2\varphi - \varepsilon) \\ i_{sq} = i_{sq}^* + |i^*| \cos(2\varphi - \varepsilon) \end{cases} \quad (15)$$

可以看出实际电流  $d, q$  轴分量中叠加了2倍供电频率的交流分量。

至此得到了单相运行下电流控制策略<sup>[8,10]</sup>, 但是上面各式均是理想情况下的分析,由于转矩脉动的存在,使得转速同样存在波动,这样得出的参考电流  $i_{sq}^*$  实际上也是变化的,从而出现电流波形畸变以及跟踪等问题,故在电机惯量很小的情况下设置相应的滤波器是有必要的<sup>[8]</sup>, 这里不再详细赘述。

## 4 单相运行物理实验研究

为了验证单相运行时的电机特性,本文在 Y 连接三相感应电机上做了单相空载运行实验。电机额定功率 2.2 kW, 额定电压 380 V, 额定电流 4.9 A, 额定转速 1 430 r/min, 控制器采用 TI 公司 TMS320LF2407A, 功率模块采用三菱公司 PM25RSB120。

针对该电机,分别做了 200 r/min 以及 1 000 r/min 的空载实验。图 4、图 5 分别为两种转速下的转速电流波形。从图 4、图 5 看出,转速虽然存在振荡,但是都能够稳定运行。高速时的电流波形更接近正弦,体现了负序旋转磁场的减弱,验证了第 2 节稳态电路的分析。图 6 为 1 000 r/min 时的  $d, q$  反馈电流,从图 6 中看出,和三相对称运行不同,这时的  $d, q$  电流为直流分量和交流分量的叠加,也验证了对式(15)的推导。

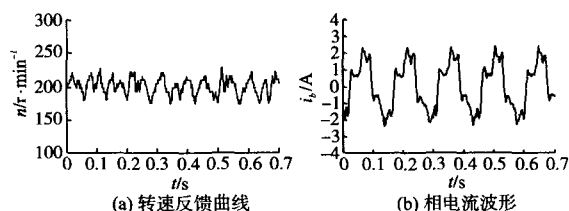


图 4 200 r/min 时转速以及相电流波形

Fig. 4 Speed and phase current curves

at the speed of 200 r/min

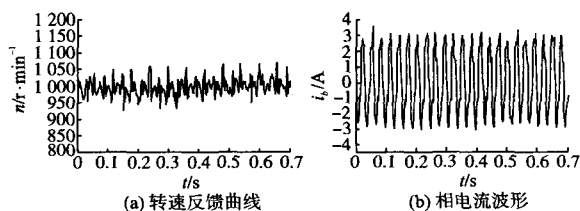


图 5 1 000 r/min 时转速以及相电流波形

Fig. 5 Speed and phase current curves

at the speed of 1 000 r/min

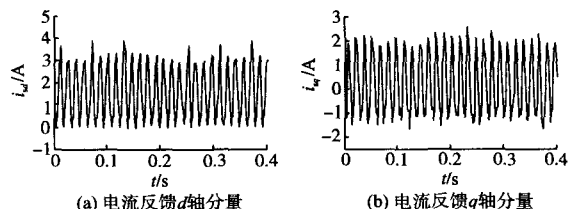


图 6 1 000 r/min 时电流反馈  $d, q$  轴分量

Fig. 6 Current feedback on  $d, q$  axis at

the speed of 1 000 r/min

(下转第 37 页)

的二阶系统自然振荡频率的范围,作为电流控制器参数选取的原则。采用该方法可以大致定量地确定 PI 调节器参数,具有一定的实践指导意义。仿真和实验结果表明,采用了这一控制策略后,系统的各项性能指标均比传统控制策略都有极大的提高,表明了这一控制策略的正确性和可行性。

#### 参考文献

- [1] Barreto L H S C, Coelho E A A, Farias V J, *et al.* The Bang-Bang Hysteresis Current Waveshaping Control Technique Used to Implement a High Power Factor Power Supply[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2004, 19(1): 160-168.
- [2] Oliva A R, Ang S S, Bortolotto G E. Digital Control of a Voltage-mode Synchronous Buck Converter[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2006, 21(1): 157-163.
- [3] Mattavelli P, Spiazzi G, Tenti P. Predictive Digital Control of Power Factor Regulators with Input Voltage Estimation Using Disturbance Observers[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2005, 20(1): 140-147.
- [4] Stephane B, Hua Jin. High Performance Predictive Dead-beat Digital Controller for DC Power Supplies[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2002, 17(3): 420-427.

- [5] Yang Ye, Mehrdad K, Victor H Q. Model Control and Implementation of Three-phase PWM Converters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2003, 18(3): 857-864.
- [6] Yukiliko S, Teruo K. State Feedback Control of Current-type PWM AC-to-DC Converters[J]. IEEE Transactions on Industrial Applications, 1993, 29(6): 793-798.
- [7] Choi J W, Kim H W, Sul S K. New Current Control Concept Minimum Time Current Control in Induction Machine Drive[C]// IEEE IECON Conference Record, 1995: 311-316.
- [8] Blasko V, Kaura V. A New Mathematical Model and Control of a Three-phase AC-DC Voltage Source Converter[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 1997, 12(1): 116-123.
- [9] Namho H, Jinhwan Jung, Kwanghee N. A Fast Dynamic DC-link Power-balancing Scheme for a PWM Converter-inverter System[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2001, 48(4): 794-803.
- [10] Jong W C, Seung K S. Fast Current Controller in Three-phase AC/DC Boost Converter Using  $d-q$  Axis Crosscoupling[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 1998, 13(1): 179-185.

收稿日期:2009-12-30

修改稿日期:2010-03-13

(上接第 15 页)

## 5 结论

本文针对三相电机缺相运行进行了详细的理论分析。利用对称分量法给出了单相运行时电机的稳态模型、电压方程以及转矩方程,为开环 Volt/Hz 运行提供了可能。紧接着给出了在三相矢量控制结构下的单相控制方案,指出  $d, q$  轴电流为直流分量和交流分量的叠加。最后给出了物理实验,验证了分析的正确性。

#### 参考文献

- [1] Debaprasad Kastha, Bimal K Bose. Investigation of Fault Modes of Voltage-fed Inverter System for Induction Motor Drive[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1994, 30(4): 1028-1038.
- [2] 邓建国. 逆变器供电下异步电动机定子断相故障运行过程仿真[J]. 中小型电机, 2002, 29(2): 9-13.
- [3] Edward Randolph Collins. Torque and Slip Behavior of Single-phase Induction Motors Driven from Variable-frequency Supplies[J]. IEEE Transactions on Industry Application, 1992, 28(3): 710-715.
- [4] Debaprasad Kastha, Bimal K Bose. Fault Mode Single-phase Operation of a Variable Frequency Induction Motor Drive and Improvement of Pulsating Torque Characteristics[J].

IEEE Transactions on Industrial Electronics, 1994, 41(4): 426-433.

- [5] Debaprasad Kastha, Bimal K Bose. On-line Search Based Pulsating Torque Compensation of a Fault Mode Single-phase Variable Frequency Induction Motor Drive[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1995, 31(4): 802-811.
- [6] William H Kersting. Causes and Effects of Single-phasing Induction Motors[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2005, 41(6): 1499-1505.
- [7] 汤蕴璆, 史乃, 沈文豹. 电机理论与运行[M]. 北京: 水利电力出版社, 1983.
- [8] Amr Saleh, Mario Pacas, Adel Shaltout. Fault Tolerant Field Oriented Control of the Induction Motor for Loss of One Inverter Phase[C]// 32nd Annual Conference on IECON, 2006: 817-822.
- [9] Fitzgerald A E, Charles Kingsley Jr, Stephen D Umans. Electric Machinery[M]. Sixth Edition. 北京: 清华大学出版社, 2003.
- [10] Amr Saleh, Adel Shaltout, Mario Pacas. Fault Tolerant Field Oriented Control of Induction Motor for Loss of One Inverter Phase with Re-starting Capability[C]// IEEE International Symposium on Industrial Electronics, 2007: 1340-1345.

收稿日期:2009-10-17

修改稿日期:2010-03-18